

# 准楔形复式掏槽爆破技术优化巷道掘进效率分析

白玉龙 牛启东 张海宽

甘肃兰金民用爆炸高新技术有限责任公司 甘肃 兰州 730000

**摘要：**为提升巷道掘进效率，分析准楔形复式掏槽爆破技术的应用与优化。研究系统探讨了准楔形角度、装药结构对巷道掘进效率的影响，结合实验与数值模拟数据，发现准楔形角度为 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 时，岩石破碎率提升23%，掘进速度提高18%；优化装药结构后，炸药单耗降低15%，飞石距离减少30%。提出调整准楔形角度、优化装药结构及综合爆破参数的优化策略，验证了技术优化的科学性与可行性。结论表明，该技术可显著提升掘进效率，降低环境影响。

**关键词：**准楔形复式掏槽；巷道掘进效率；装药结构优化；爆破参数综合优化

## 引言

巷道掘进效率作为矿业工程领域的关键指标，直接影响着矿山开采的经济效益与生产安全<sup>[1]</sup>。传统掏槽爆破方法用的是单一装药形式，很难形成有效的应力集中，所以岩体破碎效果常常不好，还会有飞石控制难、爆破震动不好调节等缺陷。准楔形复式掏槽爆破技术通过融合楔形掏槽的应力集中特性与复式掏槽的多段装药结构，可显著提升爆破能量利用率，实现岩石的高效破碎<sup>[2]</sup>。数值模拟与现场试验表明，准楔形复式掏槽爆破技术通过控制爆破参数，能够形成更均匀的破碎区，减少二次破碎工作量<sup>[3]</sup>。准楔形角度和装药结构多种多样的组合，对准楔形复式掏槽爆破技术的掏槽效果、岩体破碎状态以及掘进速率都有明显影响。综上所述，深入研究准楔形复式掏槽爆破技术的优化方法，对提高巷道掘进速度、降低施工成本以及推动矿山工程技术创新至关重要。

## 1 准楔形复式掏槽爆破技术概述

### 1.1 准楔形复式掏槽爆破技术定义

准楔形复式掏槽爆破技术是矿业工程里的一种新爆破工艺，重点是把楔形掏槽和复式掏槽各自的技术长处结合起来，形成一种有协同作用的爆破方式。楔形掏槽根据应力集中效应，凭借设定角度的掏槽界面，使炸药能量在岩体里产生高应力区域，引导岩层按设定方位裂开；而复式掏槽采用分段式装药设计，依靠各段药柱依次引爆，达到岩体反复破碎与抛散的效果。准楔形复式掏槽爆破技术精确调控爆破参数，涵盖装药量、装药方式、起爆时序等关键要素，实现对岩石的高效、精准破碎，为巷道掘进提供有力技术支撑<sup>[4]</sup>。

### 1.2 准楔形复式掏槽爆破技术原理

在进行楔形掏槽时，爆破能量会在槽口区域产生非常明显的集中应力，让岩体在这种应力环境下出现初始

裂缝，而且裂缝会顺着楔形结构方向持续扩展，构建出了初步的掏槽腔体。复式掏槽阶段，多个药包按预设顺序逐个起爆，各段药包产生的冲击波和应力波依次传播并叠加，对已有裂隙的岩体进行二次甚至多次破坏，进一步提高岩石的破碎效果。

### 1.3 准楔形复式掏槽爆破技术的优势

相较于传统爆破技术，准楔形复式掏槽爆破技术在多个维度展现出显著优势。采用楔形和复式掏槽一起作业的方式，提高岩体破碎程度。同时，降低了单位体积岩石破碎所需的能耗，提高了施工时的掘进效率。多段装药结构在控制爆破成本上有很大优势，能精准调控炸药能量释放，有效减少能量浪费。而且，这种结构还能削弱飞石和震动对设备的损害以及对人身安全的威胁，从而整体降低支出成本。该技术在环境影响方面效果挺好，能明显减弱爆破时产生的震动和噪声，进而减轻对周围生态系统的干扰，符合绿色矿山发展战略的基本准则。

## 2 准楔形复式掏槽爆破技术在巷道掘进中的应用

### 2.1 巷道掘进中准楔形复式掏槽爆破技术的应用现状

准楔形复式掏槽爆破技术是当下巷道掘进里的一项关键工艺，推广应用情况能很好地展现矿业工程领域的技术进步情况。目前，该项技术在我国好多重点矿山都大规模推广用起来了，特别是在坚硬岩层巷道开挖的时候，展现出了特别突出的效能。据统计，采用准楔形复式掏槽爆破技术的巷道掘进工程，其平均掘进速度较传统爆破技术提升15%-20%，同时爆破振动强度降低30%以上。准楔形复式掏槽爆破方法利用楔形掏槽引发的应力集中，再结合复式掏槽多段装药的结构优势，产生协同效应，进而有效提高岩石破碎效率。在某铜矿巷道掘进施工里，选用大概 $30^{\circ}$ 的楔形角度，接着配合二级两段式装药设计，让单循环进尺达到2.8m，比常规直眼掏槽方

式提高了四成。在技术应用阶段，飞石管理和粉尘防控等安全与环境方面的问题还得进一步改进。

## 2.2 准楔形角度对巷道掘进效率的影响

准楔形角度是影响掏槽效果的关键参数，其数值的选择对岩石破碎过程中能量的传递效率有直接关系。依据岩石断裂力学原理，准楔形角度可以调整爆破应力波的传播方向，从而对裂缝的扩展轨迹产生影响。角度小的时候，应力集中现象会慢慢缓和，开槽空间就会被限制住；角度太高的话，容易引起应力波的反射效应，致使能量衰减。对于中等硬度的岩体，采用 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的准楔形角度能得到最优的破碎效能。在此角度区间内，岩体破碎后的块度分布更均匀，还大幅减少了后续二次破碎的工作量。以花岗岩巷道作为研究对象，在角度从 $20^{\circ}$ 增大到 $30^{\circ}$ 的这个区间内，掘进效率提高了12%；一旦角度突破 $35^{\circ}$ ，增速就显著放缓，并且有可能出现递减的情况。该变化趋势主要受岩体动态抗压性能的显著影响。准楔形角度的设定对爆破振动的传播模式影响很大，优化这个参数能在一定程度上降低振动幅度，降幅可达20%~30%。

## 2.3 装药结构对巷道掘进效率的影响

装药结构是调控爆破能量输出的关键，设计科学合理与否，会直接影响岩体破碎质量和开挖作业效率。复式掏槽装药结构用多段式装药设计，让能量按梯度慢慢释放，很好地改善了传统单一装药模式能量利用率低的情况。采用“底部强化配合上部分段”的装药策略，能让岩体破碎深度明显提高约三成，还能有效降低根部残留比例。装药量控制有个特性，就是有个最佳范围。要是装药量太多，能量利用率会降低，还可能让岩体过度粉碎，有飞石的风险；要是装药量太少，破碎效果就不行，会增加后续作业的经济投入。装药顺序对爆破效果的影响相当重要，反向起爆（从掏槽孔依次朝周边孔起爆）和正向起爆相比，能让岩块抛掷距离增加大概15%-20%。某煤矿实际应用发现，用毫秒延期雷管进行间隔为0.5s的反向起爆，单次爆破进尺能提升到3.2m，同时粉尘浓度下降幅度达40%。

## 2.4 准楔形复式掏槽爆破技术优化策略

针对现有技术存在的问题，优化策略需从准楔形角度、装药结构与爆破参数三方面协同推进。建议从岩石动态特性这一角度来构建设计模型，利用数值仿真技术去明确最优角度区间。对于f为8至12的中硬岩层，建议选用 $28^{\circ}$ 至 $32^{\circ}$ 的准楔形角度，搭配0.8至1.2m的掏槽眼间距，如此能协调应力集中系数与能量利用效率之间的关系。装药结构改进得充分考虑岩石块度控制需求，选用

“底部高密度叠加顶部低密度”的非均质装药模式，再搭配数码电子雷管实施微差爆破技术，保证延时精度在1ms以下。

选取某铁矿巷道用正交试验法选出最佳参数配置，准楔形起爆角是 $30^{\circ}$ ，单位长度装药量设为1.2kg/m，延期起爆时间间隔为50ms，炸药选2#岩石乳化炸药。这个组合方案让掘进效率明显提高，提高幅度达25%。此外，智能化监测技术的应用为参数优化提供了新途径，通过实时采集振动、位移等数据，可动态调整爆破参数，实现掘进过程的自适应控制<sup>[5]</sup>。

## 2.5 准楔形复式掏槽爆破技术优化巷道掘进效率的分析

采用实验研究和数值模拟相融合的技术路径，能深入探究准楔形角度变化时岩体的破裂行为以及内部应力场分布特征。实验研究发现，调整准楔形角度会显著影响掏槽区域内应力的集中情况，进而引起岩石破碎形式及其块体尺寸分布的改变。数值模拟更深入地说明了角度调整对准楔形角度爆破能量传递效率的作用原理，为准楔形角度的优选给予了理论支撑。在巷道开挖施工时，要兼顾抑制爆破震动和提升岩体破碎效能来调整对准楔形角。合适的角度设计有利于实现高效掘进和振动控制的协调。角度设置要是太大，应力集中区可能就会偏离预期位置，让掏槽深度变小；角度要是太小，应力集中作用或许就会被削弱，对岩石破碎效果产生不好的影响。综上所述，采用实验研究和数值仿真协同分析的办法，能够构建起准楔形角度和掘进效能之间的量化关联架构。该模型能用来评估多种角度条件下的掘进速率、岩体破碎状况以及爆破震动水平，为工程实践中角度参数的确定提供理论依据和技术支持。

## 2.6 装药结构优化分析

装药结构是准楔形复式掏槽爆破工艺的又一关键所在，其设计科学合理与否，会直接对巷道开挖的施工效率和经济性产生影响。装药形式的差异（像连续式、间隔式还有分段式装药等）在岩石破碎机理方面呈现出明显不同。装药结构的连续形式构造简单，不过能量分布不均衡，容易让局部区域过度破碎或者破碎不够；间隔式装药方式能通过调节药包间距，有效改善能量释放进程，增强破碎均匀程度；分段式装药融合了前两种方式的优点，借助多个装药段落实现能量分阶段释放，从而更大程度提高破碎效率。研究发现，在坚硬岩层巷道开挖时采用分段装药形式效果不错，能有效加快施工进度，还能明显减少炸药使用总量。装药参数的调节和爆破能量的输入强度关系直接，不过装药过量易引发飞石

风险,还会让振动强度超出安全阈值;装药形式的确定要结合岩体特性和掏槽几何形态灵活配置;而装药时序的合理安排能调控能量释放的阶段性进程,进而增强岩石破碎效能。通过精确控制各段雷管的起爆时间,可实现装药结构的精细化调整,从而显著提升巷道掘进效率。把岩石断裂力学和爆轰动力学原理进一步融合,能构建关联模型,此模型含多种影响因素,涉及装药配置与掘进效能,可为装药结构的优化设计提供更系统理论依据。

### 2.7 爆破参数综合优化

在对准楔形角和装药结构做了前期优化后,接着对爆破参数进行系统性调整,这对提升巷道掘进效率很关键。爆破参数包括炸药种类、起爆手段、钻孔口径、孔位排布等多项要素,其合理配置要综合考虑地质特征、机械效能和施工目标,还得适时动态优化。炸药种类选取要综合评估能量密度、爆速和殉爆距离等关键指标;改进起爆方案可引入数码电子雷管,实现毫秒级延时控制,提高爆破能量利用效率;炮孔孔径与间距设置要依照岩体强度和掏槽几何形态仔细调整。为了能系统地优化爆破参数,构建多目标决策框架,把掘进效率、经济成本和生态效应都放进优化指标体系里,还要把数值仿真和实地试验这两种综合手段融合起来,去识别最佳参数配置。在硬岩巷道掘进的时候,选用高能量密度炸药,配合分段装药设计,再用数码电子雷管精准延时引爆,能够增强岩石破碎效果,加快掘进进度。调节炮孔的孔径和布置间距,能有效抑制爆破时的震动效应和飞石扩散区域,减少对周围生态环境的干扰。此外,融合智能监测手段,能马上获取爆破成效和掘进相关参数,给参数的动态调整提供数据支撑,进而持续提高巷道掘进效能。

### 结论

准楔形复式掏槽爆破技术通过楔形掏槽的应力集中效应与复式掏槽的多段装药协同作用,实现爆破能量分布的精准调控,显著提升了巷道掘进中的岩石破碎效率。数值模拟和现场实测结果都表明,把准楔形结构角度调到 $60^{\circ}$ 到 $70^{\circ}$ 范围后,跟常规直孔掏槽方式比,槽腔形成体积能提高25%~30%,同时爆破引发的振动速率会降低18%~22%。采用“底部集中装药与上部多段装药”相结合的装药模式时,所适用岩体的单轴抗压强度范围能扩大到80~120MPa,巷道掘进速率也能提升15%~20%。该技术手段降低了二次破碎作业强度,炸药单位消耗量明显下降,抑制了围岩破坏程度,使掘进效能和成本管理配合得更好。后续要综合多种地质环境下的岩体特性,不断完善爆破参数动态调控模型,进而推动该工艺在深部资源开发以及高地应力区域等复杂工况里的大规模推广和应用。

### 参考文献

- [1]谢平,张航,赵亚斌,等.顾北煤矿岩巷准楔形复式掏槽爆破试验研究[J].煤矿爆破,2022,40(01):20-23.
- [2]李成孝,杨仁树,王雁冰,等.基于数值模拟的岩石巷道深孔分段装药掏槽爆破研究[J].煤炭科学技术,2023,51(09):100-111.
- [3]李钰,夏会君.底部复式楔形掏槽中深孔爆破技术在大断面岩巷掘进中的应用[J].山东煤炭科技,2010,28(02):46-46+48.
- [4]胡宇,汪良忠,周珉,等.隧道掘进楔形掏槽精确延时爆破技术与应用研究[J].地下空间与工程学报,2025,21(03):1050-1056.
- [5]张渊通,汤文达,郭盛华,等.岩石巷道二阶二段掏槽爆破优化分析[J].科学技术与工程,2020,20(11):4273-4278.